

Федеральное агентство научных организаций
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ТЕОРИИ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ
ГЕОФИЗИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИТПЗ РАН)

УДК 550.38
Инв. № 2015-7



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТПЗ РАН
член-корреспондент РАН
А.А.Соловьев

«18» марта 2015 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ ПО ПРОЕКТУ
СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕКОВЫХ ВАРИАЦИЙ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ
(промежуточный, за 2014 год)

Заведующий лабораторией № 3
канд. физ.-мат. наук

М.Г. Шнирман

Москва 2015

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работы,
директор ИТПЗ РАН
чл.-корр. РАН



А.А. Соловьев

Ответственный исполнитель:

гл. науч. сотр.
докт. физ.-мат. наук



А.В. Хохлов

РЕФЕРАТ

Отчет 17 с., 4 рис., 1 источник

ГЕОМАГНИТНАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ, ВЕКОВЫЕ ГЕОМАГНИТНЫЕ
ВАРИАЦИИ, СТАТИСТИЧЕСКАЯ ИНВЕРСИЯ ПАЛЕОМАГНИТНЫХ
ДАННЫХ, ДАННЫЕ ПО ОСАДКАМ И ВУЛКАНИТАМ

Исследования по проекту в 2014 году выполнялись в двух направлениях: 1) участие совместно с Геофизическим центром РАН в организации новых геомагнитных обсерваторий; 2) изучение вековых геомагнитных вариаций на основе статистических свойств палеомагнитных данных. В рамках первого направления была выполнена установка измерительного оборудования и отладка передачи данных в реальном времени в обсерватории «Климовское» (с. Ротковец Архангельской области). В результате в настоящее время обсерватория работает в штатном режиме и передает данные измерений в Геофизический центр РАН. В рамках второго направления усовершенствован новый метод статистической инверсии палеомагнитных данных с целью его использования для анализа данных по осадкам и вулканитам.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ	5
2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	7
2.1. Участие в организации новых геомагнитных обсерваторий	7
2.2. Изучение вековых геомагнитных вариаций на основе статистических свойств палеомагнитных данных	12
3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	16
4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	17

1. ВВЕДЕНИЕ

Проект являлся частью Программы № 7 фундаментальных исследований ОНЗ РАН ОНЗ-7 "Геофизические данные: анализ и интерпретация" и исследования по нему выполнялись в рамках подраздела 70 "Физические поля, внутреннее строение Земли и глубинные геодинамические процессы" Раздела VIII "Науки о Земле" Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы.

В 2013 году была начата организация новой магнитной обсерватории «Климовское» геобиостационара «Ротковец» (село Ротковец Архангельской области). Работы состояли в строительстве из немагнитных материалов двух павильонов (вариационный и абсолютный) на бетонном фундаменте с заливкой пилонов под размещение измерительной аппаратуры. К началу 2014 года строительство павильонов было завершено, и в 2014 года проводились работы по установке в них измерительной аппаратуры и пуску обсерватории в эксплуатацию с последующим включением ее в российский сегмент сети ИНТЕРМАГНЕТ.

Характеристики магнитного поля за длительный период времени принято давать в спектральных терминах. Например, Гипотеза Осевого Диполя утверждает, что осреднение всех направлений будет совпадать с направлением оси вращения Земли. В терминах статистики это гипотеза о математическом ожидании величины, которая наблюдается за длительный период времени. Разумеется, операция усреднения имеет отношение к математическому ожиданию лишь в том случае, когда за это время процесс является стационарным. Аккуратная формулировка подобных гипотез, предложенная Констабль и Паркером называется моделью Большого Гауссовского Процесса (БГП) и состоит в задании таблицы коэффициентов спектрального разложения поля (дипольные члены, квадрупольные и т.д.), рассматриваемых как случайные величины – каждый коэффициент приводится вместе со своим математическим ожиданием и дисперсией. Предполагается также, что все законы распределения гауссовские. Для принятия или отвержения такой гипотезы надо научиться сравнивать соответствующую модель с реальными палеомагнитными данными. Основная нетривиальность таких сравнений состоит в правильном учете того, что

- экспериментальные данные являются направлениями, то есть имеют геометрическую, а не числовую природу;
- данные направлений содержат ошибки;
- данные в разных географических точках с точки зрения модели должны быть устроены весьма по-разному.

Действительно, если варьировать спектральные члены в рамках заданной моделью уклонений, то даже визуальную картину возможных направлений в несовпадающих географических точках сильно различают.

В последние годы был сформулирован принципиально новый алгоритм выполнения проверки статистических гипотез о поведении спектра в

терминах статистики направлений (метод статистической инверсии). Суть алгоритма состоит в том, что модель БГП позволяет явно указать ожидаемую в каждом географическом пункте плотность распределения направлений; следовательно, если модель верна, то данные должны быть согласованы с этой плотностью. Проверка этих согласований на всех данных и является статистической проверкой гипотезы, при этом учтены необходимость правильного учета ошибок в данных и принадлежность палеомагнитных данных географически разным разрезам. Работы по проекту в 2014 году состояли в развитии метода статистической инверсии с целью создания возможности интерпретации палеомагнитных данных по осадкам и их использование для проверки моделей БГП.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Участие в организации новых геомагнитных обсерваторий

В течение 2014 года главный научный сотрудник ИТПЗ РАН А.В. Хохлов совместно с сотрудниками Геофизического центра РАН (ГЦ РАН) принял участие в завершении работ по организации магнитной обсерватории «Климовское» (Рис.1), функционирующей на базе геобиостационара «Ротковец» (деревня Климовская, Коношский район Архангельской обл.) Института физиологии природных адаптаций Уральского отделения Российской академии наук (ИФПА УрО РАН). Последний организационный этап был связан с наладкой регулярных магнитометрических наблюдений в этой обсерватории.



Рисунок 1. Территория обсерватории «Климовское» (июнь 2014 г.). На переднем плане абсолютный павильон, за ним – вариометрический.

В июне 2014 года А.В. Хохлов и сотрудники ГЦ РАН выполнили следующие работы.

1. Установка и подключение полного комплекта оборудования стандарта ИНТЕРМАГНЕТ в измерительных павильонах обсерватории «Климовское».

Это оборудование включает:

- феррозондовый магнитометр D&I Fluxgate Model G на немагнитном теодолите (деклинометр/инклинометр) производства MinGeo (Венгрия) совместно с Датским метеорологическим институтом, MinGeo 010;
- феррозондовый векторный магнитометр производства Датского метеорологического института, FGE, который в 2011 г. был временно установлен в главном здании геобиостационара;
- протонный оверхаузеровский скалярный магнитометр производства GEM Systems (Канада), GSM-19;
- систему сбора и передачи магнитных данных производства MinGeo (Венгрия), Magrec.

Наряду с перечисленным оборудованием установлена аппаратура дополнительного оснащения:

- система отопления, состоящая из модифицированного измерителя ПИД-регулятора одноканального ОВЕН ТРМ10 и тепловых панелей;
- устройства усиления сигнала путем преобразования протокола RS232 в RS585 - ICP I-7520;
- автомобильные аккумуляторы с зарядными устройствами.

2. Организация энергоснабжения обсерватории, а также монтаж и подключение в испытательном режиме системы автоматической терморегуляции вариометрического павильона.

Для энергоснабжения скалярного магнитометра в абсолютном павильоне и векторного – в вариационном организована отдельная низковольтная (12 В) сеть. Поддержка электрического напряжения в ней осуществляется 12-вольтовой аккумуляторной батареей, расположенной в предбаннике абсолютного павильона и подсоединенной к сети 220 В через зарядное устройство. Низковольтная линия электропитания между павильонами подвешена на столбы вместе с кабелем, по которому поступают данные с блока электроники векторного магнитометра.

Обогревательная немагнитная панель, закрепленная в главном отсеке абсолютного павильона, и феррозондовый магнитометр на немагнитном теодолите питаются от сети 220 В.

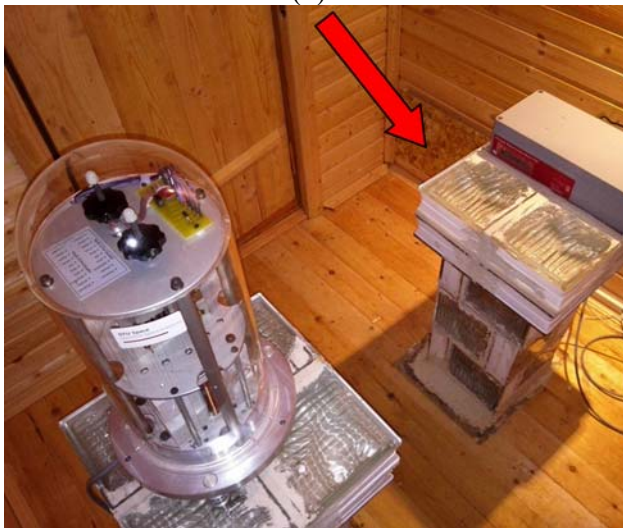
Внешнее и внутреннее обустройство вариационного павильона представлено на Рис. 2. В павильоне в пространстве между внутренним и внешним отсеками смонтирована оригинальная немагнитная система терморегуляции. Данное устройство осуществляет регулировку мощности нагревательной панели, установленной во внутреннем отсеке павильона (Рис. 2, б). Внутренняя греющая панель (отмечена красной стрелкой на Рис. 2, в) обеспечивает разницу температуры с окружающей средой в 8°C. Внешняя греющая панель (Рис. 2, г) между стенками внутреннего и внешнего отсеков, имеющая более высокую мощность, способна поддерживать разницу температур порядка 10°C. Таким образом, при работе обоих нагревателей возможно поддерживать температуру внутри павильона до 20°C выше наружной. Целесообразна эксплуатация отопительной системы в двух режимах: зимнем (2-3°C) и летнем (18°C).



(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 2. Вариационный павильон: общий вид (а); система термоконтроля (б); векторный магнитометр (в); внешняя греющая панель (г).

На Рис. 3 показаны внешний вид (Рис. 3, а) и внутреннее обустройство абсолютного павильона. Датчик протонного магнитометра закреплен на небольшом постаменте с помощью пластилина на деревянной подставке (Рис. 3, б). В абсолютном павильоне также присутствует греющая панель, которая обеспечивает надлежащие условия эксплуатации феррозондового деклинометра/инклинометра на немагнитном теодолите и комфортные условия для работы магнитолога-наблюдателя в холодное время года (Рис. 3, б). Наведение на визирную цель при абсолютных наблюдениях осуществляется через маленькое окно (Рис. 3, в). Для удобства технического обслуживания низковольтной системы электроснабжения подводящие

контакты линий, подключенные к аккумулятору, помечены ярлыками (Рис. 3, г).



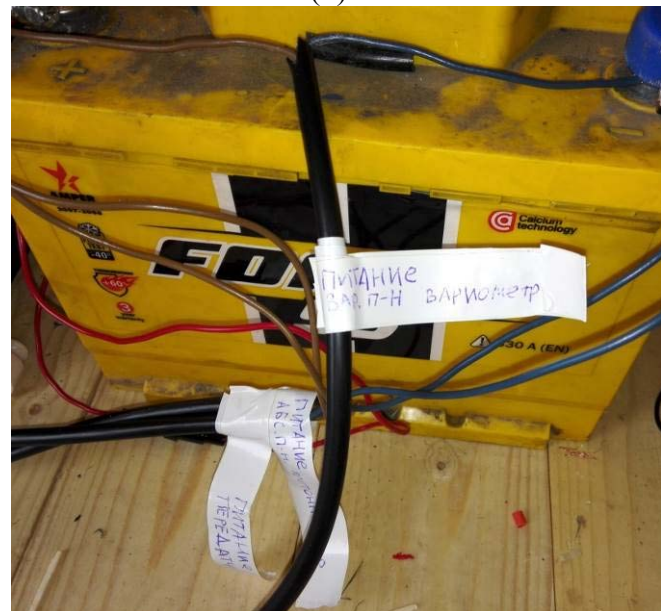
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 3. Абсолютный павильон: общий вид (а); размещенная аппаратура: деklinометр/инклинометр на теодолите и протонный магнитометр (б); вид на окно для наблюдения визирной цели (в); аккумуляторная батарея низковольтной сети (г).

3. Настройка регистрации магнитных данных и их передачи в российско-украинский геомагнитный центр данных в ГЦ РАН.

Передача цифровых данных протонного магнитометра в главное здание осуществляется с помощью преобразователя сигнала RS 232 в RS 585 для увеличения дальности сигнала до главного здания геобиостационара. Сигнал передается по витой паре. В главном здании расположен аккумулятор 12 В, который служит для питания системы сбора данных и приемного преобразователя сигнала ICP I-7520. Данные с векторного магнитометра передаются по отдельной витой паре напрямую к системе сбора без предварительного усиления. Таким образом, данные скалярного и векторного магнитометров поступают к системе сбора независимо.

Система сбора данных представляет собой компьютер Magrec-4 (ОС Debian 4). Для передачи данных на сервер ГЦ РАН используется 3G модем ZTE MF 192. Программное обеспечение компьютера настроено на передачу десятиминутных измерений и запись их в существующий суточный файл. На данном этапе передаются отчёты значений полной напряженности магнитного поля с трёхсекундной дискретизацией (файлы .F), компоненты вектора полной напряженности с минутной дискретизацией (файлы .MIN) и температурные данные с вариометра (файлы .SUP). Рабочее место оператора обсерватории в главном здании показано на Рис. 4.

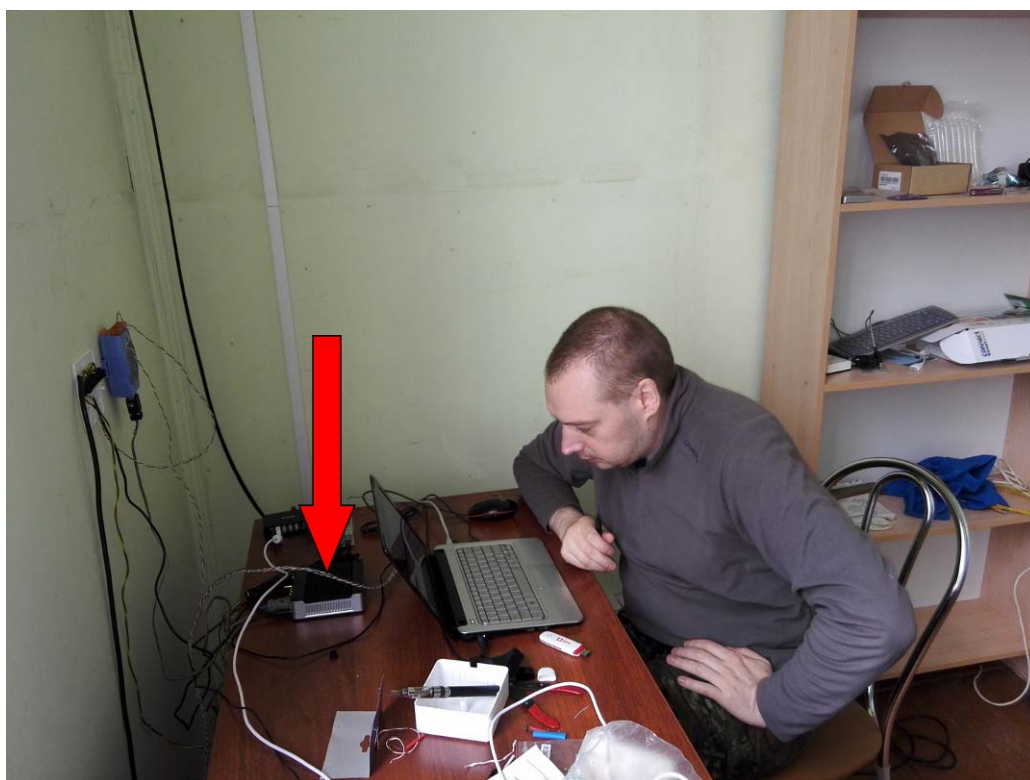


Рисунок 4. Общий вид рабочего места оператора (на фото – ведущий инженер ГЦ РАН А.А. Груднев). Стрелка указывает на система Magrec.

В сентябре 2014 года А.В. Хохлов после очередного аварийного отключения в Климовском энергосети выполнил работу по замене и наладке зарядного устройства, а также установке и подключению датчика терморегуляции, который предварительно прошел дополнительное тестирование в Москве (но не показал никаких отклонений в работе).

В результате может быть сделан следующий вывод: *строительство обсерватории в целом завершено, налажена ее работа в штатном режиме и передача данных измерений в Геофизический центр РАН.*

2.2. Изучение вековых геомагнитных вариаций на основе статистических свойств палеомагнитных данных

В последнее время активно пополняется база данных TAFI (Time-Averaged Field Initiative), где качество новых данных заметно выше и все параметры точности указываются явно. Это позволяет поставить задачу о поиске наилучшей модели БГП, отвечающей глобальным или региональным данным. Поскольку речь идет о статистической инверсии, достаточно ясно, что интересный результат должен включать в себя достаточно большое и разнообразное множество разрезов, поскольку спектральные коэффициенты для глобального поля не могут быть вычислены из поведения поля только в одном каком-то регионе. Основываясь на коллекции данных TAFI эпохи Брюнес, удалось показать, что они могут быть непротиворечиво описаны лишь моделями с несколькими зональными членами и достоверно противоречат модели, содержащей один лишь осевой диполь. Конкретно в модель вошли квадрупольный и октупольный члены с заведомо ненулевыми математическими ожиданиями, в частности, это означает, что усреднение по направлением статистически достоверно не совпадает с осевым диполем.

Принципы разработанного метода статистической инверсии могут быть кратко объяснены следующим образом. Каждому местоположению разреза отвечает диктуемое моделью БГП распределение точек на локальной сфере направлений. Явное описание плотности этого распределения в терминах склонений и наклонений мало помогает решению задачи сравнения, поскольку соответствующие склонения и наклонения коррелированы. В рамках разработанного метода каждому измеренному направлению сопоставляется пара чисел (t, s) , принимающих значения на отрезке $[0,1]$ и характеризующих, грубо говоря, положение измерения на линиях уровня постоянной плотности предписанного моделью теоретического распределения. Математически показано, что если данные согласованы с моделью (например, сгенерированы соответствующим датчиком), то соответствующие пары чисел (t, s) отвечают равномерному распределению точек в единичном квадрате. Обратное, если распределение пар (t, s) статистически значимо отличается от равномерного распределения в квадрате, то исходные данные противоречат модели. Наконец, если измерение имеет ошибку, выраженную в терминах величины α_{95} , то можно явно указать, как надо изменить теоретическую плотность, чтобы учитывать

вклад ошибки. Такое преобразование данных, выраженных изначально в терминах наклона, склонения и α_{95} к парам чисел (t, s) было названо **выравниванием**. После выравнивания данные, относящиеся к разным разрезам (предполагается некоррелированность), можно объединять, и глобальная коллекция палеонаправлений с учетом модели преобразуется в большую выборку точек в единичном квадрате. Таким образом, вопрос о соответствии данных и модели решается статистическим тестом на равномерность в единичном квадрате преобразованных данных.

Проверка выборки на равномерность – это хорошо изученный вопрос и существует ряд методов, которые несложно применить на практике. Все они устроены аналогично с широко известным тестом Колмогорова-Смирнова, а именно: по выборке вычисляется величина d характеризующая отклонение от равномерности, причем закон распределения этой величины для случая идеально равномерных случайных данных известен в явном виде. Поэтому можно оценить вероятность $P(d)$ того, что такое (или даже большее) значение d может возникнуть для равномерного распределения. Если эта вероятность мала, скажем менее 0,05, то можно сделать вывод, что распределение исследуемой выборки не совпадает с равномерным. При сравнительно больших значениях указанной вероятности считается, что аргументов против равномерности распределения выборки нет. Таким образом, результатом конкретного теста на равномерность является значение величины $P(d)$. Поскольку существуют различные тесты, то уместно применять их все: если окажется что минимальное значение среди всех соответствующих $P_1(d)$, $P_2(d)$, $P_3(d)$, ... $P_n(d)$, менее 0,05, то значит, что какой-то из тестов утверждает неравномерность.

В 2014 году начал изучаться вопрос о соответствии реальных данных по палеомагнитной напряженности (эпохи Брюнес) статистическим моделям БГП и прежде всего модели QC Кидлера и Куртийо (Quidelleur & Courtillot). Эта задача интересна по нескольким причинам.

1. Ценность математической модели для приложений определяется, в первую очередь, возможностью использования модельных данных для расчета тех или иных параметров. Например, в палеомагнетизме часто используется виртуальный осевой геомагнитный диполь VADM. Ясно, что определение этого параметра в ситуации небольшого числа разреженных данных будет связано с целым рядом соглашений и аппроксимаций; напротив, моделирование поля позволит дать оценки параметра исходя из аналитических выражений или синтетических данных. Заметим, что при этом статистическое сравнение значений параметров VADM по модельным и по реальным данным является (возможно, очень слабым) тестом на совместность данных и модели.

2. Интенсивность модельного поля является скалярной случайной величиной, но она не является гауссовой случайной величиной (хотя при некоторых условиях близка к ней), поэтому ее свойства не вполне очевидны. Сравнения данных и модели способно внести некоторые новые сведения о соответствии законов распределения реальных данных и синтезированных

по статистической модели данных, в частности, о влиянии географического положения на форму распределения. Наконец, необходимо уточнить связь декларированной точности данных со свойствами указанных распределений, поскольку возможно моделировать данные с декларированной ошибкой измерения.

3. Различные статистические модели БГП могут оказаться достаточно близкими с точки зрения предсказываемых ими направлений поля, но при этом существенно отличаться значениями напряженности модельных полей, поэтому использование данных по напряженности поможет гораздо более полно решить вопрос о дискриминации моделей, ранее тестирувавшихся лишь на реальных данных по палеонаправлениям.

4. Исследование данных палеонапряженности, которые не вписываются в статистическую модель (общую для напряженности и направлений палеомагнетизма) позволит уточнить методику Телье измерения палеонапряженности и может помочь выявлению некоторых новых свойств геомагнитных вариаций.

Для решения общей задачи детального сравнения следует использовать, как и в работах с данными направлений, технику статистического выравнивания данных. В случае одномерных распределений этот подход вполне классический и гораздо более прост по компьютерной реализации, которую еще предстоит осуществить. В результате применения выравнивания будет получено достаточно тонкое сравнение статистической модели и имеющихся реальных палеонапряженностей. Сам по себе такой подход не является новым, но для задач палеомагнетизма это его первое применение. Исследование выбросов (относительно статистической модели) будет проводиться с учетом всего опыта получения данных палеонапряженности методом Телье.

Метод статистической инверсии (по направлениям) был применен следующим образом. Рассматривалось семейство БГП, отличающихся лишь двумя зональными членами: g_2^0 и g_3^0 (то есть квадрупольным и октупольным). Все прочие параметры БГП были выбраны такими, как в модели QC, то есть дипольный член имел математическое ожидание 30 мкТ, остальные (кроме перечисленных зональных) имели нулевое математическое ожидание, а дисперсии были выбраны в соответствии со значениями, предложенными в модели QC. Для каждой рассмотренной модели было осуществлено преобразование выравнивания одних и тех же данных, и к выровненным данным применялись те же шесть тестов на равномерность, что и ранее. Выбирая указанные выше зональные члены из некоторого прямоугольного грида, можно построить функцию минимального значения $P(d)$ по всем тестам. Оказалось, что эта функция имеет весьма примечательный вид, А именно, она принимает очень маленькие значения всюду кроме небольшой области, в которой ее значения заметно превосходят упомянутый выше порог 0,05. Более того, внутри этой области есть достаточно острый пик значений, примерно равный 0,15. Таким образом, для всех моделей БГП с параметрами вне указанной области (в частности для

чисто дипольной модели) можно утверждать, что данные модель опровергают, а наилучшая модель, совместимая с данными, имеет средние значения $g_2^0 = -0,3$ и $g_3^0 = 1,5$. Появился также положительный ответ на вопрос, можно ли описать среднее поле эпохи Брюнес только одними зональными членами. Полученный результат открывает дорогу целой серии исследований коллекций данных в рамках нового единого подхода к статистической инверсии, опробованного на реальных данных.

Полученные результаты опубликованы в статье [1].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работ по проекту пущена в эксплуатацию Обсерватория «Климовское» (с. Ротковец Архангельской области), осуществляющая измерения магнитного поля Земли. Обсерватория работает в штатном режиме и непрерывно передает данные измерений в Геофизический центр РАН. Объем передаваемых данных составляет порядка 3 мегабайт информации в день. В течение года от обсерватории будет поступать порядка 2 гигабайт информации. Планируется включить Обсерваторию в российский сегмент сети ИНТЕРМАГНЕТ.

В результате развития метода статистической инверсии палеомагнитных направлений стала возможной интерпретация палеомагнитных данных по осадкам и их использование для проверки моделей Большого Гауссовского Процесса (БГП), описывающих вековые вариации магнитного поля Земли в статистических терминах.

Обработка новых палеомагнитных данных подтвердила полученный ранее статистически убедительный отрицательный результат проверки для всех кроме одной модели БГП (модель Quidelleur & Courtillot).

4. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хохлов А.В. Вековые геомагнитные вариации: статистические свойства палеомагнитных данных // Геофизические исследования, 2014, т.15, № 4. С.20-34..